

粒子-流体間物質移動に関する研究

著者	菊地 賢一
号	696
発行年	1983
URL	http://hdl.handle.net/10097/11645

氏 名	菊 地 賢 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 59 年 1 月 11 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 44 年 3 月 東北大学工学部応用化学科卒業
学 位 論 文 題 目	粒 子 - 流 体 間 物 質 移 動 に 関 す る 研 究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 只木 楨力 東北大学教授 藤 縄 勝彦 東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 斎藤正三郎 東北大学教授 鈴木 睦

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

粒子-流体間物質移動は、固体反応、不均一系固体触媒反応、晶析などを始めとする固気あるいは固液接触装置中で広く起っている現象である。このため、装置設計の基本的情報の一つである粒子-流体間物質移動係数に関する研究は古くから行われており、対象となった物質移動系も固定単粒子、固定層、流動層、攪拌槽、懸濁気泡塔、円管内二相流など広い範囲にわたり、数多くの実験値や相関式が提出されている。しかし、信頼性ある実験値の蓄積が未だ不十分な分野が残されており、そのために研究者により相関式が異なるという問題がある。また、物質移動に与える流動の影響を表わす無次元数の定義が異なるため、種々の系の物質移動を統一的に評価することが困難であるといった問題も残されている。

本研究は、実験値が不足している分野について物質移動係数の測定を行うとともに、より普遍性ある相関変数として「粒子一個に関するエネルギー消散速度」 ϵ_p という新しい概念を導入し、これを用いて種々の物質移動系における実験値を統一的に相関づけようとしたものであり、全編5章より成っている。

第2章 固定単粒子，固定層，流動層における粒子－流体間物質移動

本章は，固定層，流動層の低レイノルズ数領域における物質移動実験の結果を述べたものである。すなわち，固定層についてはShallow bed，流動層については希釈流動層を用いて実験を行ない，結果を軸方向流体混合の影響を考慮に入れて解析することにより物質移動係数を求めた。一方，粒子周りの局所的流動場におけるエネルギー消散速度と物質移動とのかかわりについての考察から，新しい相関変数として「粒子一個に関するエネルギー消散速度」 ϵ_s をEq (1)

$$\epsilon_s = (\Delta p / \rho) (U_r / D_p) \quad (1)$$

(ρ は流体の密度， U_r は相対速度， D_p は粒子径， Δp は D_p 間の圧力損失)のように定義し，これを含むSpecific power group ($\epsilon_s^{1/3} D_p^{4/3} / \nu$)を固定単粒子，固定層，流動層のそれぞれについて導入した。そして，この相関パラメータを用いて，固定単粒子については既往の文献値，固定層については本実験結果ならびに既往の文献値を整理した。固定層の結果を，Fig. 1a)に示す。粒子レイノルズ数 Re_0 を用いた従来の相関 (Fig. 1b) では Re_0 への依存性が $Re_0 \approx 30$ 付近で変るため，二つ以上の式が用いられていたが，Specific power groupを用いた本相関 (Fig. 1a) では $Re_0 = 10^{-3} \sim 10^3$ の広い流動領域にわたる実験値を一つの式で表わすことが出来た。得られた相関式を次に示す。

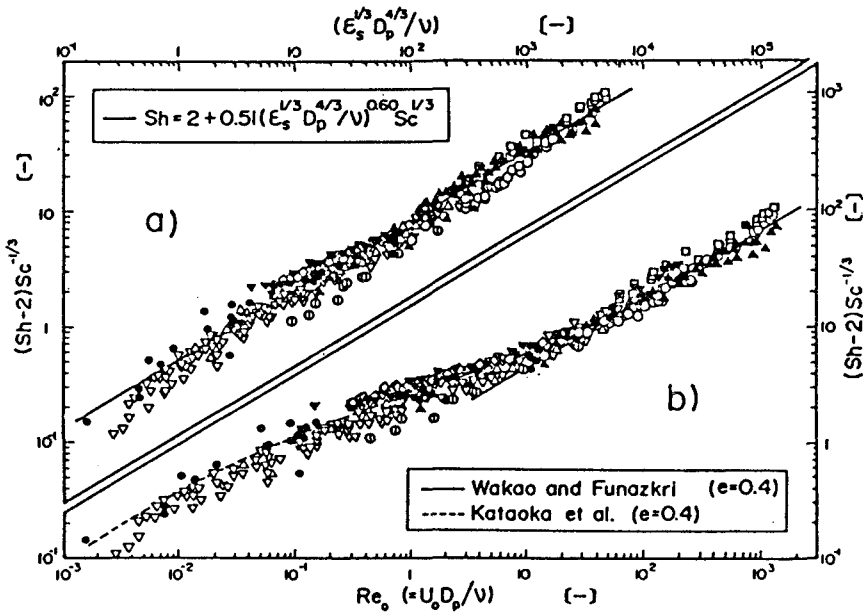


Fig.1 Correlation of Sherwood number to Schmidt number and specific power group (a) or Reynolds number (b) for fixed beds. \diamond denotes the author's observed values, and the other keys the published ones.

固定単粒子について

$$\begin{aligned} Sh &= 2 + 0.59 \left(\epsilon_s^{1/3} D_p^{4/3} / \nu \right)^{0.57} Sc^{1/3} \quad (2) \\ 2 &< \left(\epsilon_s^{1/3} D_p^{4/3} / \nu \right) < 63000, \quad 570 < Sc < 1420 \end{aligned}$$

固定層について

$$\begin{aligned} Sh &= 2 + 0.51 \left(\epsilon_s^{1/3} D_p^{4/3} / \nu \right)^{0.60} Sc^{1/3} \\ 2 &< \left(\epsilon_s^{1/3} D_p^{4/3} / \nu \right) < 4600, 505 < Sc < 70600 \end{aligned} \quad (3)$$

また、これらの相関式は、 ϵ_s の概念を用いて整理した流動層に関する本実験値および既往の文献値ともほぼ一致した。したがって ϵ_s の概念は流動層にも適用出来ることが分った。

第 3 章 攪拌槽における粒子－流体間物質移動

攪拌槽中の高度に発達した乱流場における粒子－流体間物質移動では、相関変数としてエネルギー消散速度が既に用いられている。しかしこの場合は、第 2 章で定義した「粒子一個に関するエネルギー消散速度」 ϵ_s とは異なり、「場に加えたエネルギーから算出されるエネルギー消散速度」 ϵ_t を用いている。そこで本章では、 ϵ_t と ϵ_s との関係について考察した。まず、 ϵ_t を含む攪拌槽の相関式と、第 2 章で得た ϵ_s を含む相関式とを比較したところ、両者はほぼ一致することから、 ϵ_t と ϵ_s は密接な関係にあると推定した。さらに、 ϵ_s の概念を乱流場に懸濁している粒子に拡張し、 ϵ_t の概念との関係を流体力学的立場から考察した結果、 ϵ_s と ϵ_t はほぼ同程度の値になることを示した。したがって、従来 ϵ_t を用いて説明していた物質移動系も、「粒子一個に関するエネルギー消散速度」の概念で説明出来ること、またこの概念によると、 ϵ_t を含む従来の Specific power group は粒子レイノルズ数と抵抗係数の関数になることを明らかにした。

第 4 章 円管内固液二相流における粒子－流体間物質移動

円管内固液二相流の物質移動に関する報告は極めて少なく、研究の遅れている分野である。そこで本章では、水平および垂直円管内固液二相流における物質移動実験、ならびに物質移動係数の算出に必要な平均粒子速度の測定を行ない、さらに第 2 章で定義したエネルギー消散速度 ϵ_s の概念を用いて物質移動係数を相関づけた。まず、円管内の粒子濃度分布、粒子速度分布を写真撮影法および新たに開発したレーザ法により測定した。次いで、それらの局所値から平均粒子速度を算出し、その結果と都田らの実験値を整理して次の実験式 Eqs. (4), (5) を得た。

垂直上昇流について

$$\bar{U}_p / (U_s)_{av} = \exp(0.010 Re_t^{0.40}) - 0.0059 Re_t^{0.69} Fr'^{1/2} \quad (4)$$

水平流について

$$\begin{aligned} \bar{U}_p / (U_s)_{av} &= \exp(0.016 Re_t^{0.36}) - 0.24 Re_t^{0.22} Fr'^{1/2} \\ 2 &< Fr' < 120, 4 < Re_t < 540, m_a < 0.05 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 \bar{U}_p 、 $(U_s)_{av}$ はそれぞれ平均粒子速度、スラリー速度、 Fr' は修正フルード数、 Re_t は終末速度基準の粒子レイノルズ数、 m_a は吐出粒子濃度である。

次に、カチオン交換樹脂と電解質溶液を垂直上向きあるいは水平に輸送し、液側物質移動律速下でのイオン交換速度を測定することにより、粒子－流体間物質移動係数を求めた。その結果をエネルギー消散速度を用いて整理したところ、広範囲の条件下で得られた水平流および垂直上昇流の実験結果が次の一つの式で相関づけられた。

$$Sh = 2 + 0.47 \left(\epsilon^{1/3} D_p^{4/3} / \nu \right)^{0.63} Sc^{1/3} \quad (6)$$

$$5 < \left(\epsilon^{1/3} D_p^{4/3} / \nu \right) < 600, 270 < Sc < 1970, m_d < 0.02$$

ここで, $\epsilon = \epsilon_s + \epsilon_t$

$\epsilon_s = (C_D/2) (U_r^3/D_p)$, $\epsilon_t = 2f (U_w)^3/D_r$ (C_D は抵抗係数, f は管摩擦係数, $(U_w)_{av}$ は流体速度, D_r は管径) である。

上記相関式 Eq. (6) を, 第2章で得た固定単粒子, 固定層, 流動層の相関式, および攪拌槽, 懸濁気泡塔に関する既往の相関式と比較した結果を Fig. 2 に示す。ここで, 固定単粒子, 固定層, 流動層, 低流速領域の円管内二相流のように迂り速度が支配的な系では $\epsilon = \epsilon_s$ であり, 攪拌槽, 懸濁気泡塔, 高流速領域の円管内二相流のように乱れが支配的な系では, $\epsilon = \epsilon_t$ である。図より, これらの各種物質移動系に関する相関式はほぼ一致しており, したがって, エネルギー消散速度を含む Specific power group は流体が静止しているか乱れているか, あるいは粒子が固定されているか懸濁しているかにかかわらず, 物質移動の相関パラメータとして広く使用出来ることが分った。

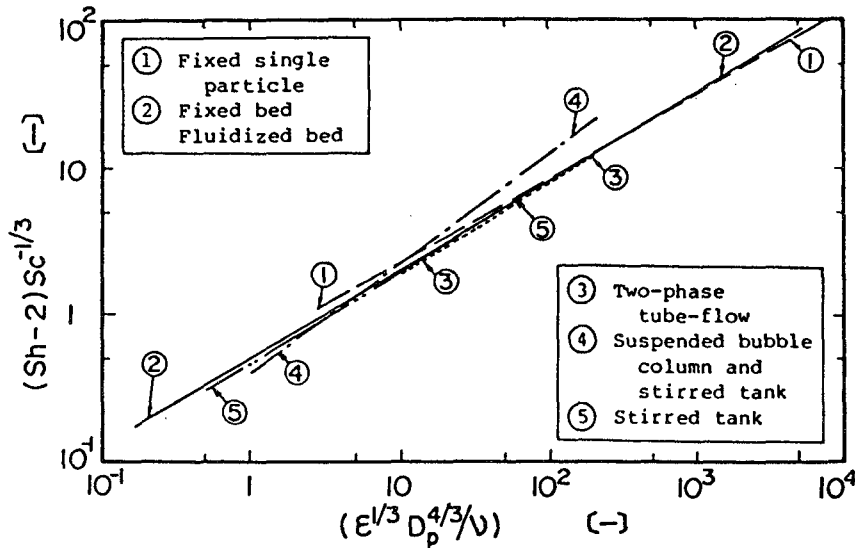


Fig.2 Correlation of Sherwood number to specific power group and Schmidt number for various mass transfer systems

第5章 総括

本章では各章で得られた結論を総括したが, 本研究で定義した「粒子一個に関するエネルギー消散速度」の概念は, 巨視的流動状態がかなり異なるように見える種々の物質移動系の相関に適用可能であり, また得られた相関式がほぼ一致することから, エネルギー消散速度を含む Specific power group は, 粒子-流体間物質移動を統一的に論じる際のパラメータとして有効であることを示した。

審 査 結 果 の 要 旨

粒子と流体の間で物質が移動する現象は、工業操作の中にも数多く見られるため、古くより研究が行われている。しかし広い領域に適用できる 精度の高い相関式がいまだ提出されていないこと、あるいは定義の異なるレイノルズ数を用いているため、種々の物質移動系を共通の指標で評価できないことなど多くの問題が残されている。

本論文は粒子としてイオン交換樹脂を用いて、種々のイオン交換実験を行うとともに、新たに定義した相関変数を用いて各種物質移動系における実測値を統一的に相関づけたもので、全編 5 章より成る。

第 1 章は緒論であり、既往の研究における問題点、研究目的および概要を述べている。

第 2 章は固定単粒子、固定層および流動層における粒子－流体間の物質移動に関する部分である。すなわち新たに、粒子一個に関するエネルギー消散速度 ϵ_s なる概念を提出し、これを含むパラメーターで上記移動係数を極めて良好に相関し得たことを述べている。

第 3 章は攪拌槽に関する部分で、従来使用されている場に加えたエネルギーの消散速度 ϵ_t と第 2 章で定義した ϵ_s を比較したところ、両者がほぼ等しいことから、 ϵ_s は攪拌槽のような乱流場に懸濁している粒子にも適用しうることを明らかにしている。

第 4 章は水平および垂直円管内固液二相流に関する部分である。まず写真撮影法と新たに開発したレーザー法を用いて粒子速度および濃度の局所値を測定し、平均粒子速度に及ぼす諸因子の影響を明らかにした。つぎに操作条件を変えて測定した粒子－流体間の物質移動係数を、 ϵ_s の概念で整理したところ、水平流および垂直上昇流の両者に適用しうる相関式を得たことを述べている。

またこの相関式を第 2 章および第 3 章で得た固定単粒子、固定層、流動層、攪拌槽ならびに懸濁気泡塔に関する相関式と比較したところ、ほぼ一致することから、 ϵ_s を含む無次元数は粒子－流体間の物質移動を統一的に論ずる際のパラメータとして極めて有効であると結論している。

第 5 章は結論である。

以上要する本論文は、粒子－流体間物質移動に関する精度の高い実験値を得るとともに、新たに定義した ϵ_s を用いて種々の物質移動系を統一的に説明したもので、装置設計に必要な相関式や、物質移動機構に関する重要な知見を数多く提供しており、化学工学ならびに化学工業に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。